



Izabel Souto Ferreira da Silva

**Simulação Numérica de Escoamento Anular em
Tubulações Horizontais Utilizando o Modelo de Dois
Fluidos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Orientador: Profa. Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro, 10 de setembro de 2015



Izabel Souto Ferreira da Silva

Simulação Numérica de Escoamento Anular em Tubulações Horizontais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. João Neuenschwander Escoteguy Carneiro

SINTEF BRASIL

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de setembro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Izabel Souto Ferreira da Silva

Graduou-se em Engenharia Química na PUC-RJ no ano de 2011, tendo participado do programa de dupla diplomação da CAPES entre os anos de 2008-2010 no Institut National de Sciences Appliquées (Lyon, França)

Ficha Catalográfica

Silva, Izabel Souto Ferreira da

Simulação numérica de escoamento anular em tubulações horizontais utilizando o modelo de dois fluidos / Izabel Souto Ferreira da Silva ; orientador: Angela Ourivio Nieckele. – 2015.

133 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento anular. 3. Modelo de dois fluidos. 4. Equação de estado. 5. Fator de atrito da interface. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao CNPq e a OGpar pelo apoio fornecido à pesquisa realizada.

Ao Engenheiro Geraldo Furtado Rodrigues, pelo incentivo à realização do mestrado e interesse no desenvolvimento do mesmo.

Ao Engenheiro José Brito de Oliveira, grande exemplo profissional e incentivador da constante busca pelo conhecimento. Meus grandes exemplos profissionais.

À Profa. Angela Ourivio Nieckele, pela incansável dedicação e vontade de ensinar e valiosa orientação a este trabalho, graças ao seu vasto conhecimento pude aprender e me interessar ainda mais pelo tema, obrigado por sempre exigir o melhor.

À minha família e, em especial, a minha vó Norma, sempre demonstrando orgulho pelas minhas escolhas profissionais e acadêmicas.

À minha mãe Solange, pelo enorme apoio em todas as situações, grande parte do meu sucesso é dedica ao seu esforço ao longo de todos esses anos.

Resumo

Silva, Izabel Souto Ferreira da; Nieckele, Angela, Ourivio. **Simulação Numérica de Escoamento Anular em Tubulações Horizontais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos**. Rio de Janeiro, 2015. 133p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Escoamentos bifásicos no regime anular são caracterizados pela formação de um filme de líquido ao redor das paredes do duto com a fase gasosa escoando na área central do duto. O presente trabalho consiste na simulação numérica de um escoamento anular em tubulação horizontal, com e sem transferência de calor através de um código unidimensional baseado no Modelo de Dois Fluidos. São considerados dois pares de fluidos, sendo o primeiro ar-água, o qual é vastamente estudado na literatura e um fluido típico encontrado na produção de petróleo formado de gás natural e óleo. Parâmetros característicos do padrão de escoamento anular como gradiente de pressão, fator de atrito da interface e espessura do filme de líquido são determinados e comparados com dados experimentais e numéricos, apresentando boa concordância. O gás natural é modelado como gás real, através da aplicação da Equação de Estado de Peng-Robinson e comparado com a modelagem utilizando Equação de Gases Ideais. Para o fluido típico selecionado, este efeito é muito pequeno tanto com relação aos parâmetros hidrodinâmicos como velocidades das fases e queda de pressão como nos parâmetros térmicos como campo de temperatura, perda de calor para o ambiente e coeficiente bifásico de troca de calor.

Palavras-chave

Escoamento anular; Modelo de Dois Fluidos; Equação de Estado; Fator de atrito da interface.

Abstract

Silva, Izabel Souto Ferreira da; Nieckele, Angela Ourivio. **Numerical Simulation of Annular Flow in Horizontal Pipes using the Two Fluid Model**. Rio de Janeiro, 2015. 133p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Annular two-phase flow is characterized by the formation of a liquid layer spread around the pipe circumference with gas flowing in the core area of the pipe. The present work consists in the numerical simulation of an annular flow in horizontal pipe, with and without heat transfer through a one-dimensional code based on the Two Fluid Model. Two pairs of fluids are considered, being the first air-water, which is widely studied in the literature and a typical natural gas and oil fluid from production oil fields. Characteristics parameters of annular flow such as pressure drop, interface friction factor e liquid film height are obtained and compared with experimental and numerical data, showing in both cases good agreement. The natural gas is modeled as real gas, using the Peng-Robinson Equation of State, and compared with the ideal gas modeling. For the typical fluid selected, this effect is quite small on the hydrodynamics parameters such as phases' velocities and pressure drop and on the thermal parameters such as temperature, heat loss for the environment and heat exchange coefficient.

Keywords

Annular flow; Two Fluid Model; Equation of State; Interface friction factor.

Sumário

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução | 18 |
| 1.1. Objetivo | 23 |
| 1.2. Organização do Trabalho | 24 |
| 2. Revisão bibliográfica | 25 |
| 2.1. Escoamento Bifásico Gás-Líquido | 25 |
| 2.2. Escoamento Anular | 27 |
| 2.2.1 Mecanismos de formação/manutenção do filme de líquido | 28 |
| 2.2.2 Filme de Líquido | 33 |
| 2.2.3 Queda de Pressão | 37 |
| 2.3. Fluidos Reais | 39 |
| 2.3.1 Modelos de Gás Real | 40 |
| 2.3.2 Escoamentos Óleo-Gás | 43 |
| 3. Modelagem Matemática | 45 |
| 3.1. Equações Governantes | 46 |
| 3.2. Equações de Fechamento | 50 |
| 3.2.1 Salto de Pressão | 51 |
| 3.2.2 Tensões Cisalhantes | 51 |
| 3.2.3 Fluxos de Calor | 53 |
| 3.3. Propriedades Termodinâmicas | 56 |
| 3.3.1 Equações de Estado | 56 |
| 3.3.3.1 Equação de Peng-Robinson | 57 |

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2 Propriedades de Mistura | 58 |
| 3.3.2.1 Propriedades de Substância Pura e Mistura | 59 |
| 3.3.2.2 Regra de Combinação Clássica de Van der Waals | 60 |
| 3.3.2.3 Calor Específico à Pressão Constante | 61 |
| 3.4. Condições de Contorno | 61 |
| 3.5. Variáveis Auxiliares | 62 |
| 3.5.1 Parâmetros Característicos do Escoamento | 62 |
| 3.5.2 Parâmetros Térmicos | 64 |
| 3.6. Escoamento Estável ou Instável | 65 |
| 4. Método Numérico | 68 |
| 4.1. Fração Volumétrica | 70 |
| 4.2. Velocidades | 71 |
| 4.3. Pressão | 73 |
| 4.4. Temperatura | 75 |
| 4.5. Condições de Contorno e Iniciais | 77 |
| 4.6. Malha Computacional | 78 |
| 4.7. Critérios para Passo de Tempo | 78 |
| 4.8. Critérios de Convergência | 79 |
| 4.9. Procedimento de Execução | 79 |
| 5. Resultados de Escoamento Ar/Água | 82 |
| 5.1. Escoamento Ar /Água em Golfada com Troca Térmica | 82 |
| 5.2. Escoamento Ar/Água Anular sem Troca Térmica | 87 |
| 5.2.1 Mapas de Padrões | 88 |
| 5.2.2 Perda de Carga | 90 |
| 5.2.3 Altura do Filme de Líquido | 94 |
| 5.2.4 Ondulações na Interface do Filme de Líquido | 96 |

| | |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Comentários Finais | 98 |
| 6. Resultados de Escoamento Gás Natural/Óleo | 100 |
| 6.1. Fator de Compressibilidade | 101 |
| 6.2. Escoamento de Gás Natural Pressurizado | 104 |
| 6.2.1. Comparação com solução bi-dimensional | 106 |
| 6.3. Influência das Velocidades das Fases no Escoamento | 112 |
| 6.3.1. Espessura do Filme de Líquido para Gás Ideal | 112 |
| 6.3.2. Comparação de Gás Ideal com Gás Real | 114 |
| 6.3.3. Velocidade da Onda | 118 |
| 6.4. Comentários Finais | 120 |
| 7. Conclusões | 122 |
| Referências Bibliográficas | 124 |

Lista de tabelas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1 - Correlações para determinar o fator de atrito. | 52 |
| Tabela 3.2 - Correlações para determinação do fator de atrito utilizadas no trabalho de Emamzadeh (2012). | 53 |
| Tabela 3.3 - Propriedades termodinâmicas das substâncias puras. | 59 |
| Tabela 3.4 - Constantes de interação binária. | 60 |
| Tabela 3.5 - Coeficientes do calor específico à pressão constante. | 61 |
| Tabela 4.1 - Termos de forçamento das equações de balanço. | 68 |
| Tabela 5.1 - Casos Lima (2009) simulados por Simões (2012). | 83 |
| Tabela 5.2 - Comparação entre modelos numéricos de parâmetros térmicos. | 84 |
| Tabela 5.3 – Comparação entre grandezas estatísticas médias das golfadas. | 87 |
| Tabela 5.4 - Parâmetros geométricos e de escoamento do estudo experimental de Farias (2010). | 97 |
| Tabela 6.1 - Composição do fluido típico. | 101 |
| Tabela 6.2 - Validação do fator de compressibilidade. | 102 |
| Tabela 6.3 - Pares de velocidades simulados. | 104 |
| Tabela 6.4 – Diferenças de modelagem. | 108 |
| Tabela 6.5 - Previsão do gradiente de pressão (Pa/m) por diferentes modelos/correlações. | 109 |
| Tabela 6.6 - Altura do filme de líquido média. | 114 |
| Tabela 6.7 - Velocidade de propagação das ondas da interface. | 119 |

Lista de figuras

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 - Esquema <i>offshore</i> de produção de petróleo. | 18 |
| Figura 1.2 - Aumento da produção brasileira em águas profundas (Petrobras, 2014). | 19 |
| Figura 1.3 - Bloqueio de duto (Petrobras, 2014) (a) Bloqueio por formação de hidrato (b) Bloqueio por deposição de parafina. | 20 |
| Figura 1.4 - Regimes de escoamento multifásico: (a) horizontal (b) vertical. Fonte: Carneiro (2006). | 20 |
| Figura 1.5 - Mapa de arranjo de fases Fonte: Stuckenbruck (2011). | 21 |
| Figura 2.1 - Mapa de padrões de escoamento (Baker, 1954). | 26 |
| Figura 2.2 - Imagem do filme de líquido capturada por técnica óptica. Fonte: Farias et al. (2012). | 29 |
| Figura 2.3 - Espalhamento devido ao escoamento secundário de gás. Fonte: Emamzadeh (2012). | 29 |
| Figura 2.4 - Espalhamento do filme de líquido por ação das ondas. Fonte: Emamzadeh (2012). | 30 |
| Figura 2.5 - Transferência de líquido por entranhamento e deposição de gotículas. Fonte: Emamzadeh (2012). | 31 |
| Figura 2.6 - – Mecanismos responsáveis pelo entranhamento das gotículas (a) ; (b); (c); (d). Fonte: Emamzadeh (2012). | 31 |
| Figura 2.7 - Conceito de bombeamento de líquido por ondas de dispersão. Fonte: Fukano e Ousake (1989). | 32 |
| Figura 2.8 - Foto da estrutura do filme de líquido na região inferior de um duto. Fonte: Hewitt et al. (1990). | 32 |
| Figura 2.9 - Espessura do filme de líquido medida em diferentes ângulos da circunferência. Fonte: Paras e Karabelas (1991). | 34 |
| Figura 2.10 - Diagrama espaço-tempo de ondas individuais. Fonte: | 35 |

Farias et al. (2012)

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 - Esquema de escoamento base estratificado. | 46 |
| Figura 3.2 - Esquema de escoamento base anular. | 46 |
| Figura 3.3 - Esquema com as diferentes temperaturas na seção transversal do duto (a) configuração de escoamento estratificado (b) configuração de escoamento anular. | 54 |
| Figura 3.4 - Condições de contorno utilizadas. | 62 |
| Figura 3.5 - Esquema das sondas de medição da altura do filme de líquido. Fonte: Farias (2010). | 64 |
| Figura 4.1 - Volumes de controle principal e deslocado e respectiva nomenclatura (a) volume de controle escalar (b) volume de controle das velocidades. | 70 |
| Figura 4.2 - Volumes de controle escalar da (a) entrada e (b) saída. | 77 |
| Figura 4.3 - Fluxograma de solução do algoritmo TDMA. | 81 |
| Figura 5.1 - Comparação dos resultados com dados experimentais e numéricos para (a) fluxo de calor (b) coeficiente de transferência de calor (c) queda de temperatura (d) queda de pressão | 85 |
| Figura 5.2 - “Holdup” ao longo da tubulação após 500s de escoamento (a) Caso 1_int (b) Caso 2_int (c) Caso 3_int (d) Caso 4_int (e) Caso 5_int. | 86 |
| Figura 5.3 - Mapa de padrões, escoamento horizontal de ar/água, D=0,0508m. | 88 |
| Figura 5.4 - Mapa de padrões, escoamento horizontal de ar/água, D=0,0158m. | 89 |
| Figura 5.5 - Teste de malha em função de $\Delta P/L$. | 89 |
| Figura 5.6 - Comparação do gradiente de pressão do presente trabalho com correlação de Taitel e Dukler (1976) para fator de atrito da interface com resultado experimental de Laurinat (1982). | 91 |
| Figura 5.7 - Comparação do fator de atrito da interface do presente trabalho com correlação de Taitel e Dukler (1976) para fator de atrito da interface com resultado experimental | 91 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| de Laurinat (1982). | |
| Figura 5.8 - Comparação do fator de atrito da interface do presente trabalho com resultado experimental de Laurinat (1982) e numérico de Emamzadeh (2012). | 92 |
| Figura 5.9 - Validação do fator de atrito da interface com dados obtidos numericamente e com dados experimentais. | 93 |
| Figura 5.10 - Comparação do gradiente de pressão do presente trabalho com resultado experimental de Laurinat (1982) e numérico de Emamzadeh (2012). | 93 |
| Figura 5.11 - Validação do gradiente de pressão com dados obtidos numericamente e com dados experimentais. | 94 |
| Figura 5.12 - Comparação da altura do filme de líquido do presente trabalho com dados experimentais de Paras e Karabelas (1991) e numéricos de Emamzadeh (2012). | 96 |
| Figura 5.13 - Oscilações ao longo do duto para o Caso 1_an. | 97 |
| Figura 5.14 - Oscilações ao longo do duto para o Caso 2_an. | 98 |
| Figura 6.1 - Comparação entre fator de compressibilidade obtido pelo modelo e calculado pelo software VRTherm para baixas pressões. | 103 |
| Figura 6.2 - Comparação entre fator de compressibilidade obtido pelo modelo e calculado pelo software VRTherm para altas pressões. | 103 |
| Figura 6.3 - Mapa de padrões, escoamento horizontal do fluido típico gás natura/óleo, altamente pressurizado. | 105 |
| Figura 6.4 - Teste de malha do fluido típico em função de $\Delta P/L$. | 105 |
| Figura 6.5 - Comparação do gradiente de pressão previsto pelo modelo de dois fluidos 1D (gás ideal e real) e pelo modelo VOF 2D do Fluent. | 107 |
| Figura 6.6 - Comparação entre fator de compressibilidade previsto pelo modelo proposto e pelo Fluent. | 108 |
| Figura 6.7 - Comparação entre gradiente de temperatura ao longo do duto previsto pelo modelo proposto e pelo Fluent. | 110 |
| Figura 6.8 - Comparação entre variação de velocidades ao longo do | 111 |

duto prevista pelo modelo proposto e pelo Fluent.

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.9 - Oscilações no filme de líquido ao longo da tubulação para diferentes velocidades superficiais da fase líquida (Casos 1, 2 e 3). | 113 |
| Figura 6.10 - Oscilações no filme de líquido ao longo da tubulação para diferentes velocidades superficiais da fase gasosa (Casos 4, 1, 5, 6 e 7). | 114 |
| Figura 6.11 - Fator de compressibilidade ao longo da tubulação para diferentes velocidades da fase gasosa. | 115 |
| Figura 6.12 - Comparação entre a altura do filme de líquido ao longo da tubulação para modelagem de gás real e de gás ideal (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3. | 116 |
| Figura 6.13 - Comparação entre a altura do filme de líquido ao longo da tubulação para modelagem de gás real e de gás ideal (a) Caso 4 (b) Caso 5 (c) Caso 6 (d) Caso 7. | 117 |
| Figura 6.14 - Detalhes da altura do filme de líquido ao longo da tubulação para modelagem (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3 (d) Caso 4 (e) Caso 5. | 119 |
| Figura 6.15 - Velocidades de propagação das ondas dos casos investigados. | 120 |

Lista de Símbolos

| | |
|--------------|--------------------------------------------|
| A | Área da seção transversal da tubulação |
| \mathbf{A} | Matriz Jacobiana do sistema característico |
| \mathbf{B} | Matriz Jacobiana do sistema característico |
| D | Diâmetro da tubulação |
| \mathbf{C} | Vetor coluna do sistema característico |
| C | Número de <i>Courant</i> |
| c | Velocidade do som |
| C_o | Parâmetro de distribuição |
| E_o | Número de <i>Eötvös</i> |
| f | Fator de fricção |
| Fr | Número de <i>Froude</i> |
| g | Aceleração da gravidade |
| h_L | Altura da superfície do líquido |
| L_s | Comprimento das golfadas |
| P | Pressão interfacial e da fase gasosa |
| R | Constante do gás |
| Re | Número de <i>Reynolds</i> |
| S | Perímetro molhado |
| s | Coefficiente de correção |
| t | Tempo |
| T | Temperatura de referência |
| U_d | Velocidade de “ <i>drift</i> ” |
| U_K | Velocidade da fase K |
| U_M | Velocidade da mistura |
| U_{sK} | Velocidade superficial da fase K |
| U_t | Velocidade de translação da golfada |
| x | Coordenada axial |

Símbolos gregos

| | |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------|
| α | Fração volumétrica da fase |
| β | Ângulo de inclinação da tubulação com respeito à horizontal |
| \mathcal{D} | Diâmetro corrigido |
| Δ | Variação de uma grandeza / Discriminante da equação do 2º grau |
| ϕ | Grandeza a ser calculada |
| Φ | Vetor solução do sistema de autovalores |
| γ | Fator de subrelaxação |
| γ^* | Razão de calores específicos |
| κ | Curvatura da interface |
| k_p | Número de onda da perturbação |
| λ_p | Comprimento de onda da perturbação |
| λ | Autovalores da análise característica |
| μ | Viscosidade dinâmica |
| ν | Viscosidade cinemática |
| ν_s | Frequência das golfadas |
| π | Constante Pi |
| \wp | Parâmetro auxiliar referente a derivada de h_L com respeito à α_L |
| ρ | Massa específica |
| σ | Tensão superficial |
| τ | Tensão de cisalhamento |

Subscritos

| | |
|----------------|-------------------------------------------------------------|
| e, w | Faces leste e oeste do volume de controle principal |
| E | Referente ao centro do volume principal de controle a leste |
| <i>entrada</i> | Entrada da tubulação |
| G | Fase gasosa |
| I | lésimo ponto nodal |
| i | Interface |
| L | Fase líquida |

| | |
|--------------|-------------------------------------------------------------|
| <i>M</i> | Mistura |
| max | Máximo valor |
| <i>N</i> | Número total de nós no domínio / medidas realizadas |
| <i>n</i> | n-ésima medida |
| <i>P</i> | Referente ao centro do volume de controle principal |
| <i>p</i> | Referente à perturbação |
| <i>r</i> | Relativa |
| <i>ref</i> | Referência |
| <i>s</i> | Referente a “slug”, ou golfada |
| <i>saída</i> | Saída da tubulação |
| <i>t</i> | Translação |
| <i>w</i> | Parede da tubulação |
| <i>W</i> | Referente ao centro do volume principal de controle a leste |

Sobrescritos

| | |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <i>o</i> | Referente ao passo de tempo anterior |
| <i>ref</i> | Referência |
| \wedge | Referente a uma grandeza aproximada mediante o esquema <i>upwind</i> |
| \sim | Referente a uma grandeza aproximada |
| * | Referente à iteração anterior |